



Comportamento térmico de argamassas de cimento com incorporação de Material de Mudança de Fase

Sandra Cunha^{1, a}, José Aguiar^{1, b}, Victor Ferreira^{2, c}, António Tadeu^{3, d}

¹ Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

² Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

³ Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal

^asandracunha86@gmail.com, ^baguiar@civil.uminho.pt, ^cvictorf@ua.pt, ^dtadeu@dec.uc.pt

Palavras-chave: argamassa; material de mudança de fase; comportamento térmico, microestrutura.

Resumo. Atualmente, os elevados consumos energéticos constituem uma das maiores preocupações da sociedade. A União Europeia definiu estratégias para reduzir os elevados consumos energéticos e minorar os seus impactos negativos até 2020. Algumas das medidas adotadas passam pela redução das emissões de CO₂ para a atmosfera e do consumo de energia primária em 20%, assim como potenciar um aumento de 20% no consumo de energia proveniente de fontes renováveis. O sector da construção é responsável por cerca de 40% do consumo de energia, sendo que grande parte se encontra relacionado com o aquecimento e arrefecimento dos edifícios. Assim, torna-se urgente utilizar soluções construtivas funcionais que minimizem os consumos energéticos nos edifícios. A incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) em materiais de construção permite a regulação da temperatura no interior dos edifícios com recurso à sua capacidade de armazenamento e liberação de energia. Assim, o principal objetivo deste estudo consistiu na caracterização do desempenho térmico de argamassas com incorporação de microcápsulas de PCM. Foram desenvolvidas 2 composições distintas, à base de cimento, sendo uma composição de referência (0% PCM) e uma composição com incorporação de 40% de PCM, em substituição da massa de agregado. As propriedades avaliadas foram a trabalhabilidade, microestrutura e desempenho térmico. Foi possível observar que a utilização de microcápsulas de PCM em argamassas contribui para uma melhoria da eficiência energética dos edifícios.

1. Introdução

A energia é um fator essencial para o desenvolvimento económico, social e melhoria da qualidade de vida dos países. O crescimento económico dos países tem causado um aumento no consumo de energia, sendo grande parte desta proveniente de fontes não renováveis, afetando diretamente a população e o meio ambiente. Os elevados consumos energéticos são uma das principais causas da deterioração ambiental global e da sobre-exploração de recursos energéticos não-renováveis [1]. Assim, a utilização de fontes de energia renováveis constitui a chave para alcançar um desenvolvimento social, económico e ambiental mais sustentável.

A eficiência energética dos edifícios é hoje um dos principais objetivos da política energética a nível regional, nacional e internacional [2]. Os edifícios são um dos setores líderes no consumo de energia nos países desenvolvidos, sendo que na União Europeia são responsáveis por cerca de 40% do consumo de energia e pela produção de cerca de 40%

das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. Atualmente, a União Europeia definiu várias estratégias para controlo e diminuição dos elevados consumos energéticos. Algumas das medidas adotadas passam pela redução de pelo menos 20% no consumo de energia, redução em 20% nas emissões de CO₂ e um aumento de 20% no consumo final de energia proveniente de fontes renováveis [3].

Numa abordagem sustentável, os edifícios devem ser projetados para garantir o conforto térmico dos ocupantes durante todo o ano, com um mínimo de energia auxiliar para aquecimento e arrefecimento. Em abordagens não sustentáveis, os edifícios são cada vez mais dependentes de sistemas de climatização que permitam garantir o conforto térmico no seu interior, o que origina um aumento no consumo de energia, bem como um aumento das emissões de gases de efeito de estufa. Consequentemente, verifica-se também um aumento dos custos de utilização do edifício, uma vez que os preços dos combustíveis fósseis têm um grande impacto nos custos de operação dos sistemas de climatização, conduzindo-nos a um aumento do custo operacional dos edifícios durante todo o seu ciclo de vida [2,4].

As argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM – phase change material) para o revestimento interior dos edifícios, podem ser vistas como uma possibilidade na tentativa de resolver, ou pelo menos minimizar, os elevados consumo energéticos dos edifícios. Os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de reduzir e deslocar os consumos energéticos, devido à sua capacidade de absorção e liberação de energia para o meio ambiente. A atuação destes materiais passa por diminuir as temperaturas máximas, aumentar as temperaturas mínimas e deslocar os consumos de picos, ou horas de maior procura, para horários de menor procura e consequentemente com menor taxação da energia, melhorando desta forma a eficiência energética dos edifícios. Assim, argamassas dopadas com PCM proporcionam benefícios sociais, económicos e ambientais, demonstrando uma contribuição significativa para uma construção mais sustentável.

Os materiais de mudança de fase podem ser aplicados em soluções construtivas para pavimentos, paredes e tetos [5]. No entanto, a sua aplicação em soluções construtivas ou materiais de construção para paredes constitui a solução preferencial para exploração do seu potencial, devido às grandes áreas de fachadas disponíveis nos edifícios.

O PCM pode ser incorporado em materiais de construção através de diferentes métodos: incorporação direta, imersão, encapsulamento e estabilização [6]. Alguns estudos têm vindo a ser publicados relativamente à incorporação de PCM microencapsulado em placas de gesso, devido ao seu baixo custo e variadas possibilidades de aplicação [7-9]. Outras soluções foram também desenvolvidas, tais como painéis de PVC alveolares, blocos e tijolos [10-11].

O estudo de argamassas com incorporação de PCM tem sido alvo de interesse por parte da comunidade científica. O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo do comportamento térmico de argamassas de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase, quando aplicadas num clima tipicamente Português. Foram desenvolvidas duas argamassas distintas, sendo uma argamassas de referência (0% PCM) e uma argamassa com incorporação de 40% de microcápsulas de PCM em substituição da massa de agregado. Foram realizadas observações da sua microestrutura com recurso a um microscópio eletrónico e ensaios térmicos.

2. Materiais, composições e procedimentos experimentais

2.1. Materiais. A seleção dos materiais, tais como ligantes e microcápsulas de PCM teve em consideração trabalhos anteriores [12-14]. O cimento utilizado é do tipo CEM II BL 32.5N com densidade de 3030 kg/m^3 . O superplastificante utilizado é baseado em poliacrilato, com densidade de 1050 kg/m^3 . A areia utilizada apresentou um tamanho de partícula médio de $439,9 \text{ }\mu\text{m}$ e uma massa volúmica real de 2600 kg/m^3 . Com base na sua distribuição granulométrica, foram obtidos os parâmetros D50, D10 e D90, correspondendo a $150 \text{ }\mu\text{m}$, $310 \text{ }\mu\text{m}$ e $480 \text{ }\mu\text{m}$, respetivamente. As fibras utilizadas são fibras sintéticas de poliamida, com um comprimento de 6 mm , uma espessura de $22,3 \text{ }\mu\text{m}$ e densidade de 1380 kg/m^3 . O PCM utilizado é composto por uma parede de melamina-formaldeído e um núcleo de parafina com uma densidade de 880 kg/m^3 , temperatura de transição de 24°C no ciclo de aquecimento e 21°C no ciclo de arrefecimento e entalpia de $147,9 \text{ kJ/kg}$. As dimensões das microcápsulas de PCM encontram-se compreendidas entre $5,8 \text{ }\mu\text{m}$ e $339,0 \text{ }\mu\text{m}$, apresentando um tamanho médio de partícula de $44,0 \text{ }\mu\text{m}$.

2.2. Composições. Foram desenvolvidas 2 formulações distintas, sendo uma composição de referência e sem incorporação de PCM e uma composição com incorporação de 40% de PCM (Tabela 1). A seleção destas composições foi realizada tendo em consideração trabalhos anteriores [12-14], sendo que estas representam as composições com melhor comportamento físico e mecânico.

Tabela 1: Formulação das argamassas (kg/m^3).

Composição	Cimento	Areia	PCM	Superplastificante	Fibras	Água
C500-0PCM	500	1418,8	0	15	0	275
C500-40PCM-F	500	642,2	256,9	15	2,5	280

2.3. Procedimentos experimentais. Foram realizados ensaios de trabalhabilidade, observações microscópicas e ensaios térmicos com o objetivo de caracterizar e compreender o comportamento das argamassas. Os ensaios de trabalhabilidade foram realizados com o objetivo de conferir uma trabalhabilidade adequada ao manuseio das argamassas desenvolvidas, tendo sido realizados com base no método da mesa de espalhamento, especificado pela norma europeia EN 1015-3 [15]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado, quando igual $200 \pm 5 \text{ mm}$. A microestrutura das argamassas foi avaliada com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento de alta resolução. Para cada composição foram preparados 2 provetes cilíndricos com diâmetro e altura de aproximadamente 1 cm . Os provetes foram armazenados durante sete dias em sacos de polietileno e posteriormente colocados em laboratório à temperatura ambiente de aproximadamente 22°C durante 21 dias. O comportamento térmico foi avaliado com recurso a uma câmara climática, programada com uma lei de temperaturas representativa de cada estação do ano da região norte de Portugal. Assim, foi analisado o comportamento térmico das argamassas na estação de inverno, verão, primavera e outono. Os dados climáticos foram obtidos a partir de uma estação meteorológica instalada no campus da Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal. Para cada composição foi desenvolvida uma célula de teste em pequena escala, com recurso a um material isolante (placas de poliestireno extrudido) com 3 cm de espessura e revestidas no interior com uma camada de argamassa de 1 cm de espessura (Figura 1). As células de teste de pequena escala possuem uma

dimensão de 200×200×200 mm³. Em cada célula foi colocado um termopar no seu interior, na zona central, a uma altura de 10 cm da base da célula. Posteriormente, as células de teste foram colocadas dentro de uma câmara climática instrumentalizada com termopares do tipo K, de forma a controlar a temperatura de ensaio. Cada termopar utilizado durante os ensaios térmicos foi conectado com um sistema de aquisição de dados de alta sensibilidade (Agilent 34970A), sendo que o registo da temperatura no interior da câmara climática e das células de teste em escala reduzida foi avaliado a cada minuto.

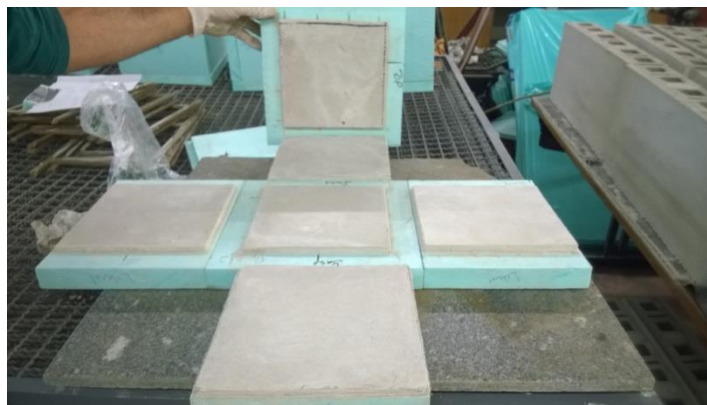


Figura 1: Células de teste em pequena escala.

3. Resultados e discussão

3.1. Trabalhabilidade. Os ensaios de trabalhabilidade revelam que a incorporação de PCM origina um aumento na quantidade de água necessária das argamassas (Figura 2). Foi possível verificar que a incorporação de 40% de PCM originou um aumento na quantidade de água de 8%. Este comportamento é justificado pela finura característica das microcápsulas de PCM e também pela possível absorção da parede polimérica que as constitui. Outros trabalhos dos autores permitiram concluir que a incorporação de 1% de fibras de poliamida em argamassas não provoca nenhum tipo de alteração na quantidade de água adicionada às mesmas [12-14].

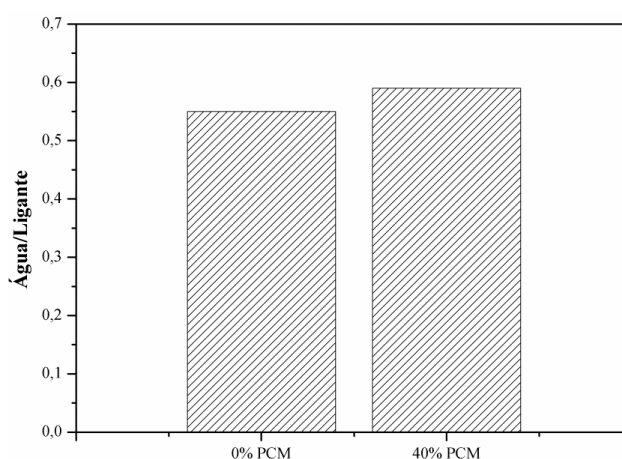


Figura 2: Razão água/ligante das argamassas.

3.2. Observações microscópicas. A avaliação da microestrutura das argamassas foi realizada com o objetivo de verificar a existência de possíveis incompatibilidades entre os diferentes materiais constituintes da argamassa. É de notar que a magnitude utilizada nos diferentes testes foi selecionada de acordo com a observação das diferentes estruturas nas argamassas. As observações realizadas (Figura 3) revelam existir uma boa compatibilidade

entre os diferentes materiais (PCM, fibras, agregado e ligante) evidenciado pela ausência de fissuras na ligação entre os diferentes materiais. Pode ainda ser observado que as microcápsulas de PCM apresentam uma distribuição homogênea na matriz das argamassas. Por outro lado, as microcápsulas de PCM mostram uma boa integridade, sem sinais de rutura ou danos, demonstrando que resistem adequadamente ao processo de mistura, aplicação e cura das argamassas.

Com o objetivo de avaliar o tamanho e distribuição dos poros nas diferentes argamassas foram realizadas outras observações microscópicas. A Figura 4 revela as alterações observadas na distribuição dos poros nas diferentes argamassas causadas pela incorporação das microcápsulas de PCM. Foi possível observar um aumento da microporosidade, assim como a presença de microporos com dimensões superiores nas argamassas com incorporação de PCM, comparativamente com a argamassa de referência. A microestrutura da argamassa de referência revela-se mais coesiva quando comparada com a argamassa com incorporação de PCM, que apresenta poros de maiores dimensões. Este comportamento pode ser explicado pela presença de uma maior quantidade de água nas argamassas aditivadas com PCM, em resultado das reduzidas dimensões do material.

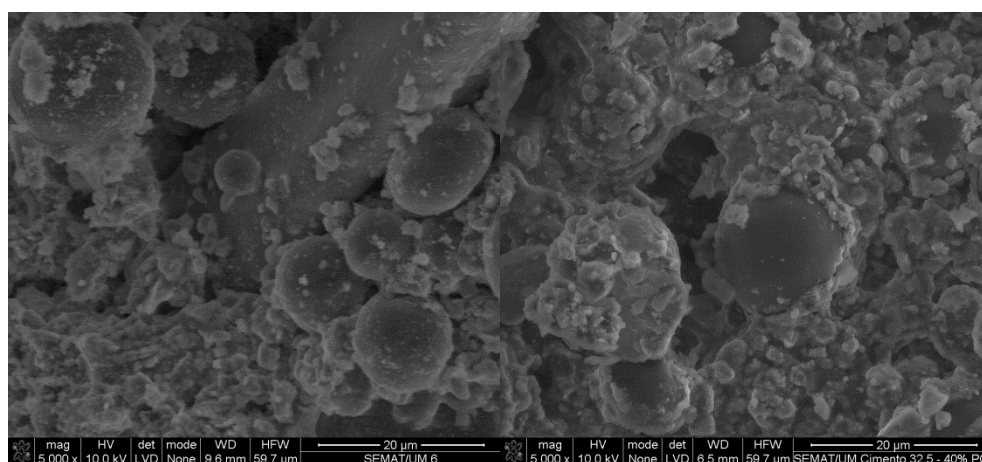


Figura 3: Microestrutura da argamassa de cimento com incorporação de 40% de PCM.

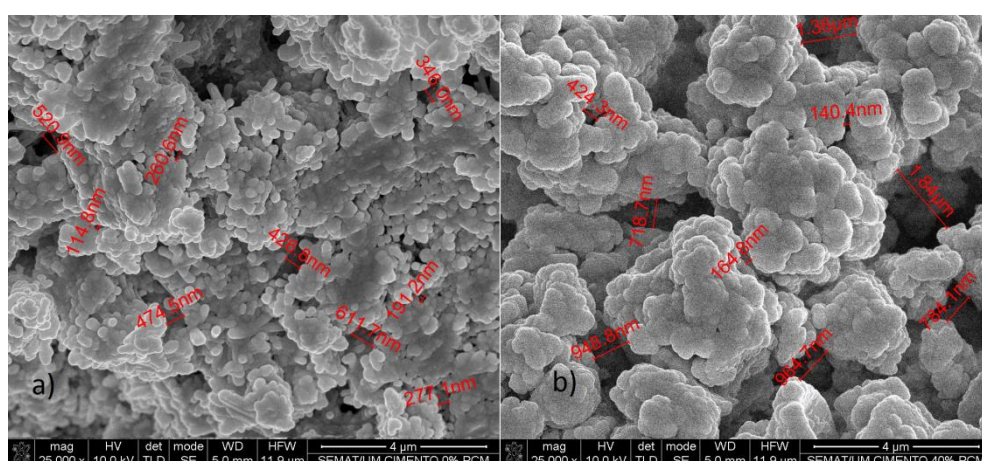


Figura 4: Microestrutura das argamassas: a) Argamassa de referência, sem incorporação de PCM (C500-0PCM); b) Argamassa com incorporação de 40% de microcápsulas de PCM (C500-40PCM-F).

3.3. Comportamento térmico. É sabido que a temperatura externa influencia significativamente o desempenho térmico do PCM [16-18]. Foi realizada uma campanha experimental, com o intuito de avaliar o comportamento térmico de argamassas com

incorporação de PCM, quando aplicadas num clima típico da região norte de Portugal. Para tal, foram avaliadas todas as estações do ano, com base em leis de temperatura definidas a partir dos dados meteorológicos.

A estação de primavera foi estudada com uma lei de temperatura com uma temperatura mínima de 12°C e uma temperatura máxima de 29°C. Na estação de outono a lei de temperatura oscilou entre os 17°C e 34°C. Por sua vez a estação de verão foi avaliada com base numa gama de temperaturas compreendidas entre os 11°C e 44°C. Por último, a estação de inverno foi avaliada para uma gama de temperaturas compreendida entre a temperatura mínima de 5°C e a temperatura máxima de 22°C. Nesta situação, a observação do efeito de PCM não foi possível, uma vez que o ponto de fusão do material não foi atingido. Para o estudo desta estação com mais detalhe será necessário a utilização de sistema de aquecimento auxiliar. Assim, no presente estudo, o efeito do PCM na estação de inverno foi considerado nulo. As leis de temperatura utilizadas para simular um dia típico de verão, inverno, primavera e outono, na região norte de Portugal encontram-se na Figura 5. O estudo de cada estação compreendeu o desenvolvimento e análise de ciclos, sendo cada um composto por 24 horas.

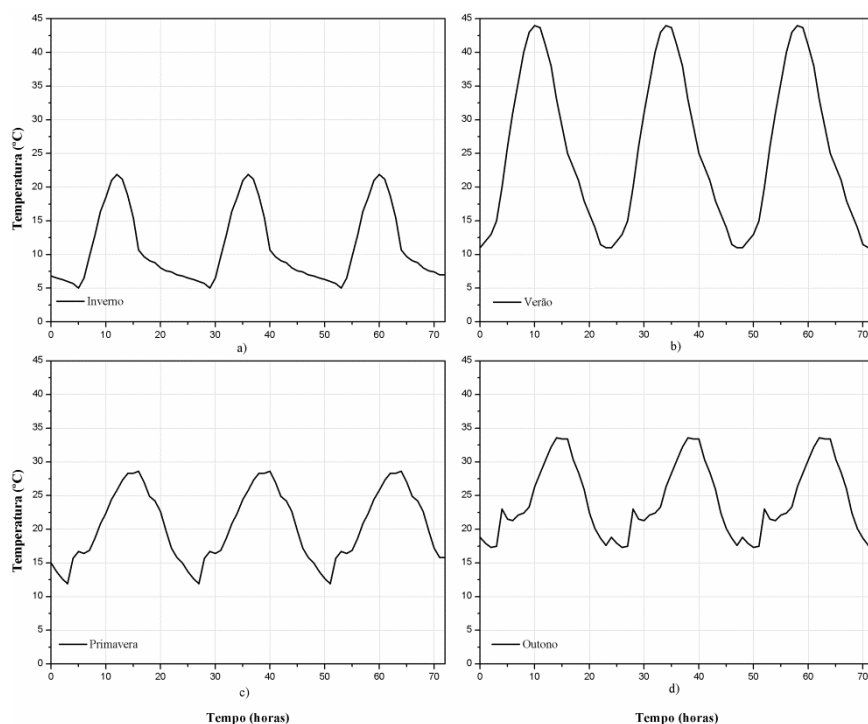


Figura 5: Leis de temperatura utilizadas para a avaliação do desempenho térmico das argamassas nas estações do ano: a) Inverno; b) Verão; c) Primavera; d) Outono.

A Figura 6 mostra o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas numa situação de verão, primavera e outono. Com base nos resultados foi possível observar que quando a temperatura atinge o intervalo de temperaturas de conforto térmico em Portugal, compreendidas entre 20°C e 25°C, ocorre a transição de fase do PCM e o comportamento térmico das argamassas começa a desenvolver-se de um modo distinto quando comparado com o comportamento térmico das argamassas de referência. É importante notar que em todos os ensaios realizados foi possível observar o efeito benéfico da incorporação de PCM, uma vez que se verificou uma diminuição das temperaturas máximas e aumento das temperaturas mínimas nas células revestidas com argamassas dopadas com PCM. Verificou-se também com base neste ensaio que a temperatura no interior das células com PCM permanece mais próxima ou até mesmo dentro das temperaturas de conforto por um

período de tempo mais longo. Este efeito traduz-se numa redução do tempo de operação dos sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento no interior dos edifícios, proporcionando desta forma uma redução nos consumos energéticos dos edifícios e aumento dos parâmetros de conforto dos seus ocupantes.

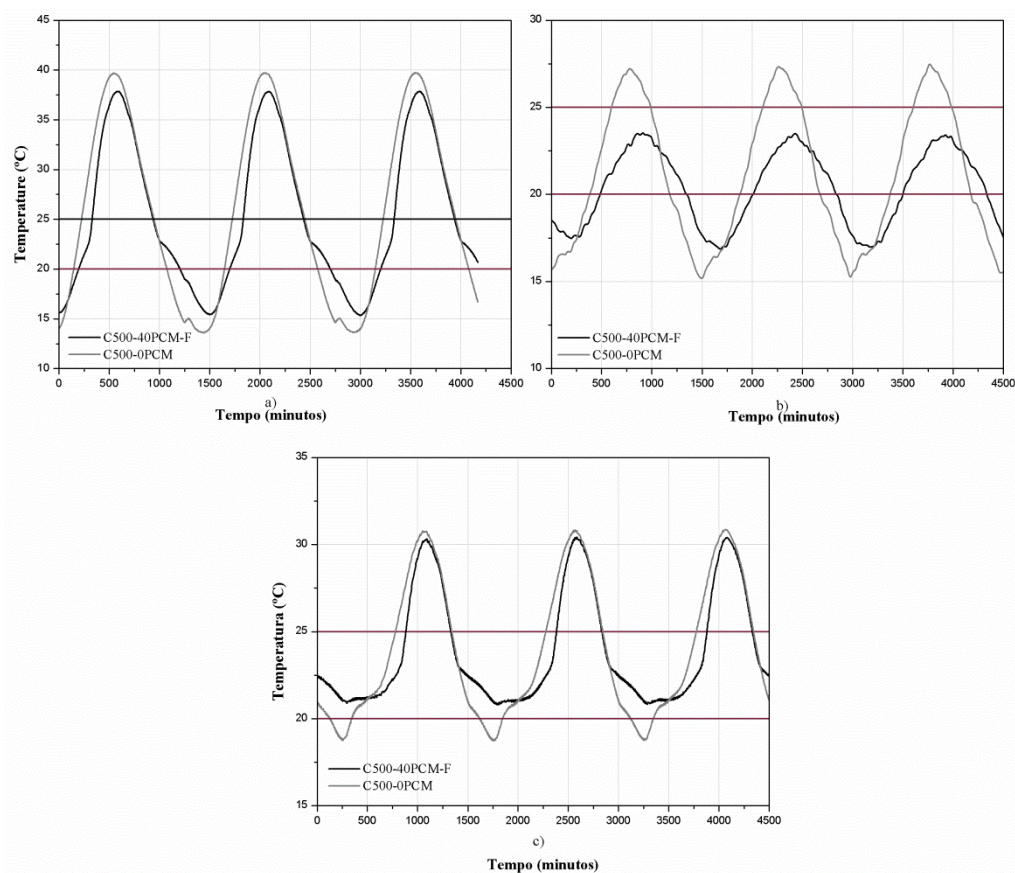


Figura 6: Desempenho térmico das argamassas: a) Verão; b) Primavera; c) Outono.

Relativamente à estação de verão (Figura 6 a)), com base nas curvas de temperatura, foi possível identificar que existe uma situação com necessidade de arrefecimento, ou seja, sempre que a temperatura é superior a 25°C e uma situação com necessidades de aquecimento, ou seja sempre que as temperaturas são inferiores a 20°C. Na situação com necessidades de arrefecimento foi possível observar que as argamassas com incorporação de PCM mostram uma taxa de arrefecimento superior e uma temperatura máxima inferior. O mesmo foi verificado para a situação com necessidades de aquecimento, na qual se verificou um aumento da temperatura mínima, evidenciando uma diminuição destas necessidades. Foi ainda possível verificar uma diminuição da temperatura máxima superior a 5% na situação de arrefecimento e um aumento da temperatura mínima superior a 8% na situação de aquecimento. Durante estes ensaios foi também observado um desfasamento temporal nas temperaturas extremas. Sendo que na situação de arrefecimento foi verificado uma desfasamento temporal na temperatura máxima de 70 minutos e na situação de aquecimento um desfasamento temporal de 60 minutos na temperatura mínima (Tabela 2). Tendo em consideração que grande parte da energia consumida nos edifícios se encontra relacionada com a climatização dos mesmos (aquecimento e arrefecimento) e a taxação diferenciada de energia durante o dia, estes resultados revelam que é possível deslocalizar os consumos energéticos mais elevados para fora das horas de maior procura, que apresentam uma taxação mais baixa o que se traduz numa vantagem do ponto de vista económico.

Tabela 2: Desfasamento temporal das temperaturas máximas e mínimas.

Estação do ano	Desfasamento temporal [min]	
	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
Verão	70	60
Primavera	250	15
Outono	70	335

De acordo com a Figura 6 b), é possível observar que a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas para revestimento interior originou uma diminuição da temperatura máxima superior a 11% e um aumento da temperatura mínima superior a 13% demonstrando que o PCM influencia de forma similar as altas e baixas temperaturas durante a estação de primavera. Foi também possível verificar que as células de teste revestidas com argamassas dopadas com PCM não apresentam temperaturas máximas superiores à temperatura de conforto de 25°C, o que se traduz na eliminação das necessidades de arrefecimento durante esta estação. Na Tabela 2 é possível também observar o desfasamento temporal das temperaturas máximas e mínimas verificadas para as células revestidas com a argamassa de referência e com PCM para a estação de primavera, tendo sido verificado um desfasamento temporal de 250 minutos e 15 minutos para as temperaturas máximas e mínimas, respetivamente.

A Figura 6 c) mostra o desempenho térmico de argamassas em estudo para a estação de outono. Neste caso, foi possível identificar que não existem temperaturas inferiores à temperatura de conforto de 20°C, o que consequentemente elimina a existência de necessidades de aquecimento para a célula revestida com a argamassa com incorporação de PCM, conduzindo a um menor consumo energético. Foi também possível verificar uma ligeira redução da temperatura máxima e aumento da temperatura mínima superior a 11%. Sendo possível concluir que para a estação de outono as argamassas com PCM exibem uma maior influência na situação de aquecimento comparativamente com a situação de arrefecimento. Foi ainda possível observar um desfasamento temporal de cerca de 70 minutos para a temperatura máxima e de cerca de 335 minutos para a temperatura mínima.

A verificação do efeito causado pela incorporação do PCM é extremamente importante. Contudo, importa também quantificar com precisão as necessidades de arrefecimento e de aquecimento, com o intuito de avaliar a poupança de energia efetivamente alcançada. Assim, com base nas curvas de temperatura (Figura 6) também foi quantificada a redução do consumo de energia durante os ciclos de arrefecimento e aquecimento, com o objetivo de avaliar a economia de energia efetivamente alcançada. Desta forma, a quantidade de graus dia superior a 25°C e inferior a 20°C foi calculada, determinando as necessidades de arrefecimento e aquecimento para manter a temperatura interior dentro da gama das temperaturas de conforto (20°C-25°C).

A Tabela 3 apresenta as necessidades de arrefecimento e aquecimento nas diferentes estações do ano. Observou-se que a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas causou um decréscimo de cerca de 14% nas necessidades de arrefecimento e aquecimento, na situação de verão. Quanto à estação de primavera verificou-se uma diminuição das necessidades de arrefecimento em 100% e uma diminuição das

necessidades de aquecimento de 7%. Por último na situação de outono, foi possível identificar uma diminuição das necessidades de arrefecimento de 20% e a eliminação das necessidades de aquecimento. Assim, foi possível verificar que a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas permite reduzir as necessidades de aquecimento e arrefecimento em todas as estações testadas. Nas estações de outono e primavera verificou-se a ausência de necessidades de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Os resultados obtidos com base nos ensaios de avaliação do desempenho térmico demonstram que as argamassas com incorporação de PCM apresentam um melhor comportamento térmico, tendo em conta a maior redução da temperatura máxima, maior aumento da temperatura mínima e maior desfasamento temporal.

Tabela 3: Necessidades de climatização (J/m³).

Composição	Necessidades de arrefecimento			Necessidades de aquecimento		
	Verão	Primavera	Outono	Verão	Primavera	Outono
C500-0PCM	269598	263040	265014	253509	255061	256811
C500-40PCM-F	225726	0	211723	219089	238647	0

4. Conclusões

A realização desta investigação permitiu concluir que a incorporação de material de mudança de fase em argamassas para revestimento no interior dos edifícios provoca alterações na sua trabalhabilidade, desempenho térmico e microestrutura.

No que respeita à trabalhabilidade verificou-se que a incorporação de PCM provocou um aumento na quantidade de água necessária a adicionar à argamassa, o que se encontra relacionado com a finura característica do PCM, necessitando a argamassa de mais água de forma a obter uma pasta homogénea.

Relativamente à microestrutura das argamassas desenvolvidas, foi possível identificar uma boa interação entre os diversos materiais que as constituem, assim como uma boa resistência das microcápsulas de PCM durante o processo de fabrico. Observou-se ainda que a incorporação de microcápsulas de PCM nas argamassas originou um aumento na microporosidade das mesmas. Esta situação pode ser justificada pelo aumento do teor de água das argamassas com incorporação de PCM.

Os ensaios térmicos permitiram verificar que a utilização de PCM em argamassas originou uma diminuição da temperatura máxima registada, um aumento da temperatura mínima, assim como um desfasamento temporal significativo entre as temperaturas extremas da argamassa de referência e com incorporação de PCM. Foi ainda verificada uma redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento no verão, primavera e outono. Sendo que na estação de primavera não se verificaram necessidades de arrefecimento e na situação de outono não se observaram necessidades de aquecimento. Sendo assim, foi possível concluir que a utilização de PCM em argamassas contribuiu para a redução dos consumos energéticos, possibilitando a utilização de energias renováveis, como a energia solar, e reduzindo a exploração de combustíveis fósseis, que por sua vez permite reduzir impactos negativos para o meio ambiente.

5. Agradecimentos

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento deste trabalho no âmbito da bolsa de doutoramento SFRH/BD/95611/2013.

6. Referências

- [1] S. Bilgen, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 38 (2014). p. 890.
- [2] N. Soares, J. Costa, A. Gaspar, P. Santos, *Energy Build.* Vol. 59 (2013), p. 82.
- [3] I. Santiago, M. Lopez-Rodriguez, D. Trillo-Montero, J. Torriti, A. Moreno-Munoz, *Energy Build.* Vol.79 (2014), p. 84.
- [4] G. Blengini, T. Carlo, *Energy Build.* Vol. 42 (2010), p. 869.
- [5] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu, *Adv. Eng. Mater.* Vol. 16 (2014), p. 433.
- [6] S. Memon, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 31 (2014), p. 870.
- [7] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, *Energy Build.* Vol. 38 (2006), p. 18.
- [8] K. Darkwa, P. O'Callaghan, D. Tetlow, *Appl. Energy* Vol. 83 (2006), p. 425.
- [9] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* Vol. 89 (2005), p. 297.
- [10] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. Gracia, A. Fernández, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 15 (2011), p. 1675.
- [11] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard, *Energy Build.* Vol. 38 (2006), p. 673.
- [12] S. Cunha, V. Alves, J. Aguiar, V. Ferreira, *Cem. Wapno Beton, Special Issue* (2012), p. 17.
- [13] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu, *Revista Matéria Rio de Janeiro* Vol. 20 (2015), p. 245.
- [14] S. Cunha, J. Aguiar, M. Kheradmand, L. Bragança, V. Ferreira, *Restoration of Buildings and Monuments* Vol.19 (2013), p. 171.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3 (1999).
- [16] A. Khudhair, M. Farid, *Energy Convers. Manage.* Vol. 45 (2004), p. 263.
- [17] J. Li, P. Xue, H. He, W. Ding, J. Han, *Energy Build.* Vol. 41 (2009), p. 871.
- [18] V. Hernández, D. Morillón, R. Best, J. Fernández, R. Almanza, N. Chargoy, *Appl. Thermal Eng.* Vol. 26 (2006), p. 2464.